J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0113
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

汾河干流附着硅藻群落时空分布特征*

刘恩辉[1]，刘　越[1]，李德鹏[2]，谢树莲[1]，刘　琪[1**]
（1：山西大学生命科学学院，太原 030006）
（2：山西省生态环境规划和技术研究院，太原 030006）

摘　要：附着硅藻是河流生态系统中重要的初级生产者，在水体营养动态和生态健康评估中具有重要指示意义。为揭示汾河干流附着硅藻群落结构的时空分布特征及影响其分布的驱动因子，本研究分别于 2021 年 4 月至 2022 年 1 月的四个季节在汾河干流设置 25 个采样点，调查记录了附着硅藻群落结构的组及其原位样点的水体理化因。结果表明，四个季节共鉴定出附着硅藻 374 种。附着硅藻群落结构在季节和空间尺度上均呈现出明显差异。念珠状等片藻（*Diatoma moniliformis*）在春秋季及冬季占据优势地位，而梅尼小环藻（*Cyclotella meneghiniana*）在夏季丰度明显升高，其中，念珠状等片藻主要分布于上游河段，而梅尼小环藻的相对丰度沿河流由上游向下游逐渐增加。α 多样性指数在不同季节之间整体差异不显著，但在空间尺度上，表现为上游河段显著高于中、下游河段。β 多样性分析结果显示，季节（R^2=0.143，P=0.001）和河段（R^2=0.136，P=0.001）均对附着硅藻群落结构产生显著影响。冗余分析（RDA）进一步表明，水温、pH、溶解氧、总溶解性固体和总磷是影响附着硅藻群落分布的主要驱动因子。
关键词：附着硅藻；群落结构；多样性；环境因子；汾河

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Benthic Diatom Communities in the Mainstream of the Fenhe River*

Liu Enhui[1], Liu Yue[1], Li Depeng[2], Xie Shulian[1] & Liu Qi[1]**
(1: *School of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *P.R.China*)
(2: *Shanxi Academy of Ecological Environment Planning and Technology, Taiyuan* 030006, *P.R.China)*

Abstract: Benthic diatoms are key primary producers in river ecosystems and reliable indicators for evaluating water nutrient dynamics and ecological health status. This study explored the spatiotemporal patterns of benthic diatom community structure in the mainstream of the Fenhe River and identified the core driving factors of community distribution. A total of 25 sampling sites were set along the river main channel, and field investigations were carried out in four seasons from April 2021 to January 2022. We simultaneously surveyed benthic diatom community composition and in-situ water physicochemical properties. A total of 374 benthic diatom species were detected throughout the four seasons. The benthic diatom community structure exhibited distinct seasonal and spatial variations. *Diatoma moniliformis* dominated the community in spring, autumn, and winter, while *Cyclotella meneghiniana* showed a significant increase in abundance in summer. In terms of spatial distribution, *D. moniliformis* is mainly distributed in upstream reaches, and the relative abundance of *C. meneghiniana* increased gradually from upstream to downstream. Alpha diversity indices showed no significant seasonal differences, but were remarkably higher in upstream reaches than in midstream and downstream reaches. Beta diversity analysis demonstrated that both seasonal variation (R^2 = 0.143, P = 0.001) and river reach differences (R^2 = 0.136, P = 0.001) significantly structured the benthic diatom community. Redundancy analysis (RDA) further confirmed that water temperature, pH, dissolved oxygen, total dissolved solids, and total phosphorus were the major environmental factors driving the spatial and temporal distribution of benthic diatom communities.
Keywords: Benthic diatoms; community structure; diversity; driving factor; Fenhe River

*2025-12-29 收稿；2026-03-23 收修改稿；2026-05-08 录用。
山西省生态环境规划和技术研究院项目（YJ-2024-03ST）资助。
**通信作者：E-mail：liuqi317@126.com

附着藻类是指依附于河流中各类基质（如石块、水生植物、沉积物等）表面生长的藻类群体，主要包括硅藻门、蓝藻门、绿藻门等门类[1]。与浮游植物相比，附着藻类可以附着于固定的生境，避免了其在河流空间分布上的均一性，能更好的反映局部环境条件的差异[2]。附着硅藻是附着藻类的主要组成部分，它们在种类数和生物多样性方面远超其他附着藻类，其群落组成和生物量变化能够反映水生态系统的健康状况。作为河流生态系统中不可或缺的重要初级生产者，附着硅藻在能量流动和物质循环过程中发挥着关键作用[3]。

河流不同河段在水动力条件、营养盐水平及人为干扰强度等方面存在显著差异，这些环境梯度直接影响附着硅藻的定殖、生长和群落演替过程，进而导致群落组成、多样性及优势种结构的空间异质性[4-5]。例如，2023 年 Zelnik 等人的研究表明，与自然河段相比，河道渠化的附着硅藻多样性显著升高，反映了人为干扰背景下生境条件变化对附着硅藻群落结构的深刻影响[6]。此外，大量研究一致指出，附着硅藻对水温、pH 等水体理化条件变化具有高度敏感性，因而被广泛应用于河流水质评价和生态健康评估中[6-9]。

近年来，随着汾河流域生态治理与综合整治工程的持续推进，汾河干流水环境条件发生了显著变化[10-12]。汾河作为山西省最大的河流，开发利用程度较高，受经济快速发展和人类活动强烈干扰的影响，流域内人口密集，沿岸分布有煤矿企业和大量农田，水体泥沙含量较高，水环境在不同季节及水动力条件下表现出明显差异[12-13]。汾河水质自上而下呈现逐渐下降的趋势，流域生态系统长期承受多重胁迫。农业径流、工业排放及生活污水输入导致水体中氮、磷等营养盐负荷增加，局部河段存在富营养化风险[14]，从而对附着硅藻群落结构及其演替过程产生重要影响。

已有研究对汾河流域的藻类群落特征进行了初步探索，例如，王爱爱[15]等发现，汾河中下游河段中，硅藻门物种数最高，但细胞密度低于绿藻门。张旭芳[16]等研究表明，汾河上游河段同样以硅藻门物种数占优，但其细胞密度低于蓝藻门。此外，现有的研究多集中于局部河段调查，尤其是太原段的调查[17-18]，其采样时间也多集中在丰水期和枯水期[15-17]，缺乏对汾河全河段、全年动态变化的监测。因此，在流域生态修复背景下，有必要开展长期、连续、多尺度的监测研究，以明确汾河附着硅藻群落的时空分布特征及主要的驱动因子。

基于此，本研究以汾河干流为研究区域，对区域中的附着硅藻群落开展调查。通过显微镜观察与计数，比较不同河段及不同季节附着硅藻的群落结构分布特征，并结合水温、电导率、溶解氧、营养盐等环境因子，采用冗余分析（RDA）探究影响汾河干流附着硅藻群落变化的主要环境因子，为汾河流域水生态保护与水质管理提供科学依据和基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及样点设置

汾河干流发源于宁武县管涔山，自北向南流经山西腹地，于运城市万荣县庙前村汇入黄河，是黄河流域第二大支流。汾河全长约 713 km，流域面积广阔，整体呈南北向纵向延伸。受水库调蓄、水坝拦截、支流汇入以及区域气候差异等多重因素影响，汾河不同河段在水动力条件、水量分配及水质特征等方面表现出显著的时空异质性。

基于汾河流域的地理格局、生境类型及水流条件差异，本研究在干流范围内布设了 25 个具有代表性的采样点（图 1）。其中，FH-1～FH-9 位于上游河段，FH-10～FH-18 位于中游河段，FH-19～FH-25 位于下游河段。附着硅藻样品及同步水环境因子的采集分别于 2021 年 4 月（春季）、2021 年 7 月（夏季）、2021 年 10 月（秋季）和 2022 年 1 月（冬季）开展。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 硅藻样品的采集、鉴定与计数　在现场使用一次性牙刷刮擦基底表面（卵石、石块）总面积为 100 cm^2 来收集样品，至少刮取 5 块石头，对于未采集到石块的样点，刷取沉水植物浸于水下的部分，用蒸馏水冲洗，然后将硅藻悬浮液保存于 100 mL 采样袋中并带回实验室。带回实验室的硅藻样品，先将样

品摇匀并用移液枪吸取 10 mL 加入 15 mL 离心管中离心，去除上清液，将沉积物转移至消解管中，加入硝酸消解 40 min，去除有机物，之后进行一系列的离心和冲洗，直至获得中性硅藻富集水样，并使用 Naphrax 胶封片，制成永久封片[19]。硅藻在光学显微镜下鉴定（OlympusBX53,×1000），从每个永久封片中，至少识别并计数 400 个壳面[20]。根据北美硅藻网（https://diatoms.org/what-are-diatoms）、欧洲硅藻鉴定系统[21]，在物种水平上完成分类单元的鉴定。

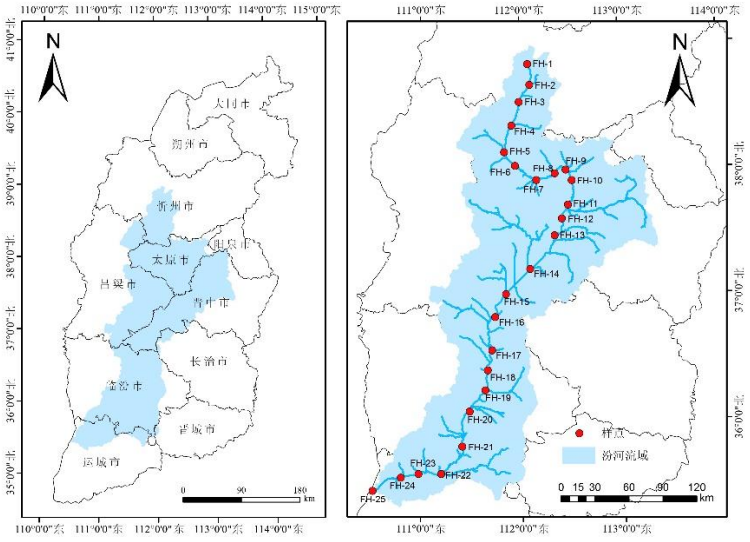

图 1 汾河流域采样点的分布

Fig.1 Spatial distribution of sampling sites in the Fenhe River Basin

1.2.2 理化因子测定　用采水器在远离河岸，水深 50 cm 处采集水样。每个采样点收集三个水样混匀以获得代表性的水样。在现场使用 YSI 便携式水质监测仪测定水温（WT）、溶解氧（DO）、电导率(Cond)、总溶解固体（TDS）、pH、盐度（Sal），实验室测定总氮（TN）、总磷（TP）、氨氮（NH_4^+-N）和化学需氧量（COD_{Mn}）。TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法（HJ636-2012）测定，TP 采用钼酸铵紫外分光光度法（GB11893-89）测定，NH_4^+-N 采用纳氏试剂法测定，COD_{Mn} 采用重铬酸钾紫外分光光度法测定。

1.3 数据处理与分析　运用 AcGS10.8 绘制采样图；所有统计分析均在 R 语言平台上使用 anova、vegan、ape、spdep、ade4 和 adespatial 程序包完成。在物种水平的分析中，首先通过堆叠柱形图展示不同样本中的物种组成，分析汾河流域各季节和各河段的优势物种及其相对丰度变化。基于硅藻丰度数据，计算 Shannon 多样性指数、Simpson 指数、物种丰富度以及 Pielou 均匀度，以评估 α 多样性。为了比较不同季节或河段之间的多样性差异，首先使用 Kruskal-Wallis 检验进行非参数检验。如果检验结果显著，则进一步使用 Dunn's 检验进行两两组间的比较，比较结果通过字母标记在图表中显示，以明确组间的显著性差异。为了评价不同点位附着硅藻群落结构的差异，使用基于 Bray-Curtis 相异指数的非度量多维标度（NMDS）进行群落差异分析，计算多维尺度下的群落相似性和差异性。接着，运用 PERMANOVA 进行群落的季节差异性检验，并在 NMDS 图中展示群落的空间分布和季节差异，使用 95% 置信椭圆表示群落的空间分布范围：结合测定的环境因子数据，进行冗余分析（RDA），探讨各环境因子（如 WT、pH、TN、TP 等）对硅藻群落结构的影响。

2 结果与分析

2.1 硅藻群落结构特征

基于鉴定和计数数据，对不同季节及不同河段的汾河干流沿岸附着硅藻群落结构特征进行了对比分析。共鉴定 374 种硅藻（含变种和变形），其中春季为 167 种，夏季为 238 种，秋季为 255 种，冬季为

223 种。在季节尺度上（图 2a），念珠状等片藻（*Diatoma moniliformis*）在春季、秋季和冬季均占据较高丰度，夏季的相对丰度则较低。梅尼小环藻（*Cyclotella meneghiniana*）则呈现相反趋势。除上述两类常见物种之外，优势度(Y) ≥ 0.02 的物种还包括偏肿内丝藻（*Encyonema ventricosum*）、橄榄绿异极藻（*Gomphonema olivaceum*）、省略琳达藻（*Lindavia praetermissa*）、披针舟形藻（*Navicula lanceolata*）、汉斯冠盘藻（*Stephanodiscus hantzschii*）、极小曲丝藻（*Achnanthidium minutissimum*）、谷皮菱形藻（*Nitzschia palea*）、细端菱形藻（*Nitzschia dissipata*）和肘状肘形藻（*Ulnaria ulna*）（表 1）。在空间尺度上，硅藻群落结构亦呈现显著差异，各季节都表现出上游物种数丰富度普遍高于中下游，春季上游 124 种，中游 64 种，下游 93 种，夏季上游 192 种，中游 131，下游 106 种，秋季上游 218 种，中游 133 种，下游 72 种，冬季上游 152 种，中游 133 种，下游 65 种。念珠状等片藻的分布主要集中在上游河段，冬季上游样点的相对丰度最高（36.1%），而梅尼小环藻的相对丰度则沿下游梯度呈递增趋势（图 2b~e）。此外，夏季的上游区域存在较多低丰度物种，反映了该区域较高的物种多样性；相比之下，中下游河段的群落结构由少数优势种主导。总体而言，汾河附着硅藻群落在物种组成上表现出显著的时空异质性。

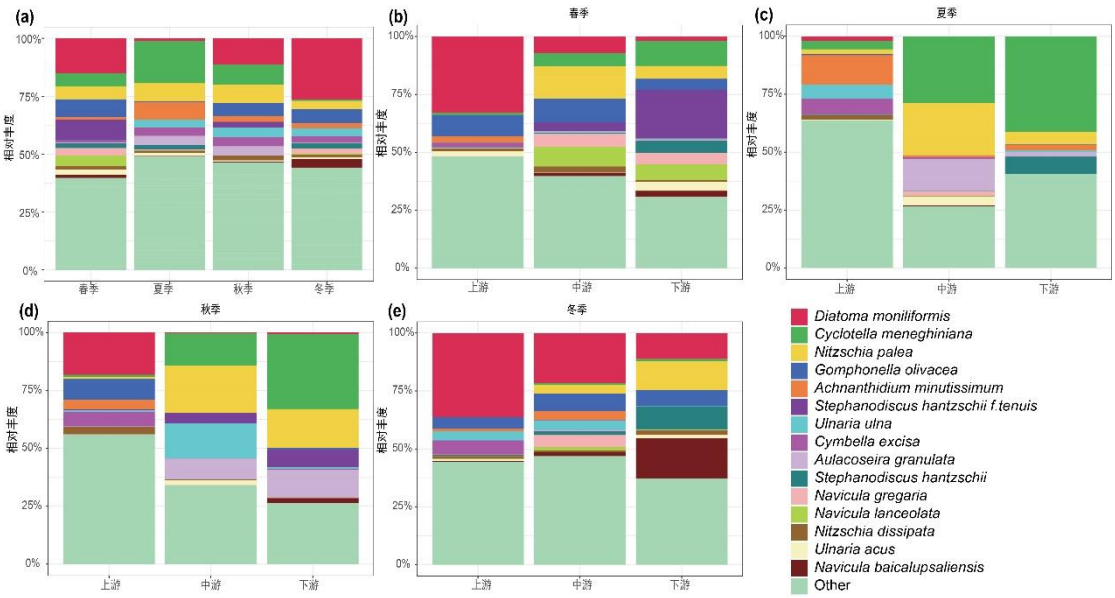

图 2 汾河干流附着硅藻群落组成的季节与河段差异

(a) 不同季节的群落组成；(b-e) 不同河段（上游、中游和下游）的群落组成

Fig. 2. Seasonal and longitudinal variations in the composition of benthic diatom communities along the mainstem of the Fenhe River. (a) Community composition across seasons; (b–d) Community composition across river sections (upper, middle, and lower reaches)

2.2 硅藻群落多样性

根据各样点的物种丰度数据计算的 α 多样性结果如图 3 所示，春、夏、秋、冬各季节样点的物种丰富度范围分别为 15～58、14～80、8～91、14～68，Shannon 指数范围为 1.67～3.18、1.15～3.63、0.88～3.07、1.28～2.97，Simpson 指数范围为 0.59～0.95、0.40～0.96、0.33～0.90、0.55～0.92，Pielou 指数范围为 0.27～0.52、0.19～0.59、0.14～0.50、0.21～0.49。其中，物种数最大值出现在秋季样点 FH-1（91），Shannon-Wiener、Simpson 和 Pielou 指数的最大值均出现在夏季样点 FH-5（分别为 3.63、0.96、0.59）。从季节格局来看，物种丰富度整体呈现出夏季、秋季和冬季高于春季的变化趋势，而 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数及 Pielou 指数则表现为春季相对较高、秋季较低的格局，Kruskal–Wallis 检验结果表明，各季节间物种丰富度及各 α 多样性指数差异均未达到显著水平（$P > 0.05$）（图

3a）。在空间分布上，不同河段间 α 多样性存在一定差异（图 3b）。具体而言，夏季上游样点的物种丰富度显著高于中游和下游（$P < 0.05$），而春季和冬季各河段间差异不显著。对于 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数，春季、秋季及冬季不同河段间均未表现出显著差异（$P > 0.05$）；而在夏季，上游样点的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数显著高于中下游（$P < 0.05$）。

表 1 汾河流域不同季节硅藻优势种及优势度

Tab.1 Diatom dominant species and their dominance in different seasons in the Fenhe River Basin

物种	优势度 Y			
	春季	夏季	秋季	冬季
Cyclotella meneghiniana	0.046	0.182	0.086	<0.02
Diatoma moniliformis	0.096	<0.02	0.071	0.190
Encyonema ventricosum	0.027	<0.02	<0.02	<0.02
Gomphonema olivaceum	0.054	<0.02	0.022	0.066
Lindavia praetermissa	0.031	<0.02	<0.02	<0.02
Navicula lanceolata	0.023	<0.02	<0.02	<0.02
Stephanodiscus hantzschii	0.050	<0.02	<0.02	<0.02
Achnanthidium minutissimum	<0.02	0.020	<0.02	<0.02
Nitzschia palea	<0.02	0.056	0.041	<0.02
Nitzschia dissipata	<0.02	<0.02	0.023	<0.02
Ulnaria ulna	<0.02	<0.02	0.026	0.022

β 多样性能够反映不同环境样本间群落结构的差异。为探讨汾河沿岸附着藻类群落在不同时空格局下的结构变化，本研究采用基于 Bray–Curtis 距离的非度量多维尺度分析（NMDS）对群落的时空格局进行可视化（Stress=0.219）。尽管 Stress 值略高，但仍可从图中看到不同分组间群落相似性的总体趋势。置换方差分析（PERMANOVA，999 次置换）显示，季节对群落组成具有显著影响（Adonis：P=0.001，R^2=0.143），说明季节变化可解释约 14.3%的群落变异；空间因素（上-中-下游）同样显著影响群落组成（Adonis：P=0.001，R^2=0.136），但解释力略低于季节效应。NMDS 图（图 4a~b）显示，春季和冬季样点总体集中于图的左下方，而与夏季和秋季样点明显分离，说明春冬两季的群落组成相似，夏秋两季的群落组成相似。此外，上游与中下游样点明显分离，而中下游样点之间差异较小，表明中下游各样点群落组成较为相似。

2.3 硅藻群落与环境因子的相关性

汾河流域各季节环境因子变化特征如表 2 所示。附着硅藻的多样性与群落结构与其生存的环境条件密切相关，因此分析环境因子对附着硅藻群落的影响具有重要意义。本文利用 R 语言对汾河附着硅藻种水平丰度数据和环境因子进行 RDA 分析（图 4 c,d），首先使用 DCA（detrended correspondence analysis）对群落梯度长度进行评估，结果显示第一轴梯度长度为 3.43，提示环境梯度较短，适合采用 RDA 方法分析群落与环境因子的关系。在构建 RDA 模型前，对除 pH 以外的环境因子进行了标准化处理，并计算方差膨胀因子（VIF），剔除了高共线性变量 Cond、Sal 和 TN，最终保留 pH、DO、WT、TDS、TP、COD_{Mn} 和 NH_4^+-N，保证模型稳健性。RDA 分析结果（图 4c-d）显示，箭头长度代表附着硅藻种对环境因子的响应强度，箭头之间的夹角反映环境因子间的相关性，其中钝角表示负相关，锐角表示正相关。整体模型显著（P=0.001），解释了约 20.5%的群落变异，表明季节变化对附着硅藻群落结构具有显著影响，而空间差异相对较小。在种水平上，丰度排名前五的关键附着硅藻对环境因子响应存在差异，例如念珠状等片藻与 WT 呈显著负相关，*G. olivacea* 与 pH 呈正相关，其余种类对 DO、TP、TDS 的响应各异，显示不同种对环境因子的敏感性差异明显。

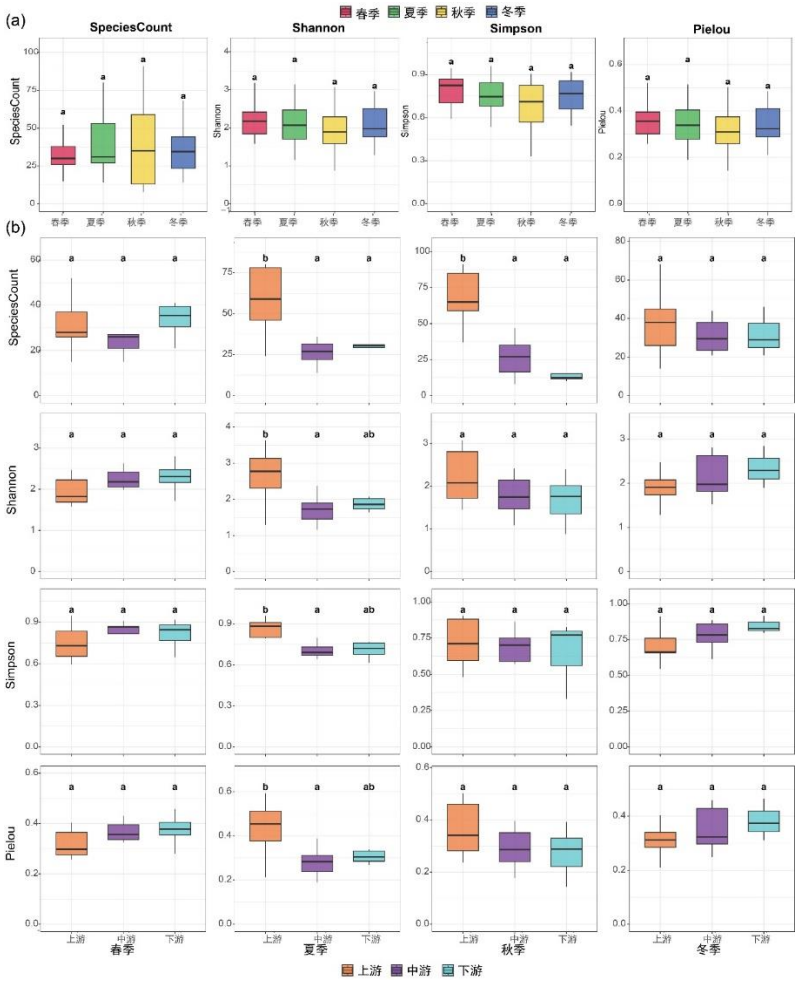

图 3 汾河流域附着硅藻多样性指数（a:不同季节；b:不同河段）（图中不同小写字母表示组间差异显著，$p < 0.05$）

Fig.3 Diversity indices of attached diatoms in the Fenhe River Basin (a: different seasons; b: different river sections) (Different lowercase letters indicate significant differences between groups, $P < 0.05$)

表 2 汾河流域水环境因子的季节变化（平均值±标准差）*

Tab.2 Seasonal variation of water environmental factors in the Fenhe River Basin (Mean±SD)*

环境因子	春季	夏季	秋季	冬季
pH	8.71 ± 0.26 ^{a}	8.41 ± 0.29 ^{a}	8.08 ± 0.41 ^{ab}	7.07 ± 3.17 ^{b}
Cond (μs/cm)	962.52 ± 449.94 ^{a}	968.12 ± 267.10 ^{a}	971.74 ± 300.03 ^{a}	900.49 ± 536.51 ^{a}
DO (mg/L)	12.06 ± 2.37 ^{ab}	9.81 ± 2.86 ^{b}	12.51 ± 2.29 ^{ab}	14.28 ± 6.68 ^{a}
WT/ ℃	13.22 ± 4.00 ^{b}	27.50 ± 4.39 ^{a}	12.31 ± 1.99 ^{b}	2.19 ± 1.98 ^{c}
Sal (‰)	0.56 ± 0.17 ^{a}	0.47 ± 0.13 a	0.48 ± 0.15 ^{a}	0.45 ± 0.27 ^{a}
TDS (mg/L)	780.14 ± 321.60 ^{a}	622.38 ± 181.70 ^{a}	631.15 ± 199.00 ^{a}	590.83 ± 349.60 ^{a}
TN (mg/L)	1.10 ± 0.72 ^{a}	1.22 ± 0.74 ^{a}	1.21 ± 0.78 ^{a}	0.84 ± 0.70 ^{a}
TP (mg/L)	0.23 ± 0.18 ^{a}	0.23 ± 0.18 ^{a}	0.25 ± 0.19 ^{a}	0.16 ± 0.17 ^{a}
COD_{Mn} (mg/L)	25.84 ± 11.16 ^{a}	26.72 ± 11.75 ^{a}	27.60 ± 12.21 ^{a}	19.00 ± 12.69 ^{a}
NH_4^+-N (mg/L)	1.20 ± 0.77 ^{ab}	1.29 ± 1.00 ^{ab}	1.47 ± 0.88 ^{a}	0.69 ± 0.63 ^{b}

*同一行字母相同代表差异不显著

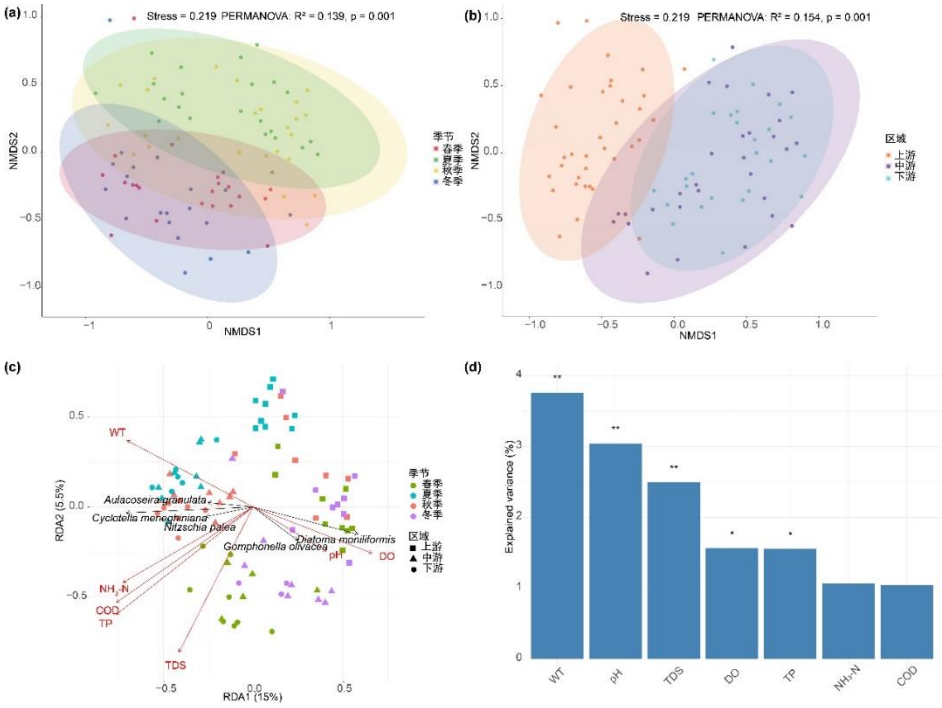

图 4 汾河附着硅藻群落时空变化及其与环境因子的关系（a-b：基于 Bray-Curtis 相异指数的汾河附着硅藻群落非度量多维尺度（NMDS）分析；c：丰度排名前五的附着硅藻与环境因子关系的冗余分析（RDA）结果；d: 使用 Envfit 检验分析 RDA，揭示各环境因子对附着硅藻群落结构的影响。

Fig 4 Temporal and spatial patterns of benthic diatom communities in the Fenhe River and their relationships with environmental factors. (a–b: Non-metric multidimensional scaling (NMDS) of benthic diatom communities based on Bray–Curtis dissimilarity; c: Redundancy analysis (RDA) showing the relationship between the top five abundant benthic diatom species and environmental variables; d: Envfit analysis of RDA results to identify the effects of individual environmental factors on species-level benthic diatom community structure)

3 讨论

3.1 附着硅藻群落结构时空分布差异

本次调查共鉴定出附着硅藻 374 种，物种数明显高于既往对汾河上游或中下游局部河段的研究结果[15-16]，进一步丰富了汾河流域硅藻物种多样性的基础数，同时反应出汾河附着硅藻的多样性较高，这可能归因于汾河位于黄土高原地区，本次调查期间春、秋、冬季节平均水温均低于 15 ℃，即使夏季，上游的河段平均水温也低于 15 ℃。一般而言，硅藻多属于适冷性类群[22]，较低的水温为硅藻的生长和繁殖提供了适宜的环境条件。从优势种组成来看，本研究中占优势的梅尼小环藻、谷皮菱形藻、念珠状等片藻等类群，与国内多数河流中常见的硅藻优势种基本一致[4-5,23-24]，表明汾河附着硅藻的群落结构具有河流生态系统的普遍性特征。在季节尺度上，汾河附着硅藻群落整体表现出较高的稳定性。本研究结果显示，α 多样性指数（Shannon-Wiener、Margalef 和 Pielou 指数）在不同季节之间差异不显著（$p > 0.05$），NMDS 分析亦表明各季节群落结构具有较高重叠度。本研究结果不仅与既往关于汾河浮游植物季节动态的研究相一致[15-16]，也与石川河、溪流河及青海湖入湖河流等相关研究结果相似[4,22,25]。已有研究指出，硅藻通常具有较为稳定的生态位及环境耐受范围，能够对季节性环境波动作出适应性响应，从而维持群落结构的相对稳定[26]。尽管整体季节差异不显著，本研究仍发现部分高丰度物种存在明显的季节演替现象，这反映出不同硅藻物种对环境因子变化具有差异化响应机制。例如，念珠状等片藻在

低温季节（尤其冬季）相对丰度较高，而在夏季显著下降；相反，梅尼小环藻在夏季的相对丰度明显上升，在冬季则相对降低。这种季节性更替主要与水温、营养盐和水动力条件的变化有关[22,26]。在空间尺度上，本研究发现汾河附着硅藻群落呈现出显著的纵向梯度变化。具体表现为上游河段的物种数及α多样性指数均高于中、下游，且物种丰富度和 Shannon 指数在上游显著高于中、下游河段（$P < 0.05$），而中游与下游之间差异相对较小，NMDS 结果亦显示上游群落结构与中下游明显分离。这一格局与不同河段受干扰情况密切相关，上游区域由于人口密度较低、人类活动干扰较弱，沿岸缺乏工业及生活污染输入[13]，营养盐浓度较低且水温相对较低，环境异质性较高，从而为附着硅藻提供了多样化的生态位条件。中游河段流经太原市、晋中市和临汾市等人口密集区，长期接纳工业排水、生活污水及农业面源污染，导致水体富营养化程度较高，整体处于中度污染水平[14]；下游河段泥沙含量较高、水体透明度降低，进一步限制了附着硅藻的生长，导致多样性水平下降[16]。该空间分布规律与其他河流底栖硅藻研究中普遍观察到的趋势相一致[8-9,27-29]，体现了河流生态系统中沿纵向环境梯度变化的基本规律，并与河流连续体理论所揭示的生态过程相吻合[30]。硅藻作为水质监测和生态评估中的指示物种，不同的物种可以指示不同的水体健康状态[31]。上游河段优势种多为清洁或寡污染水体的指示种，如极小曲丝藻和念珠状等片藻[31]，反映出该河段水质状况良好；而中下游河段优势种则逐渐转变为耐污或富营养化指示种，如谷皮菱形藻和梅尼小环藻[4,32-35]，些物种具有较强的附着能力和环境耐受性，能够适应有机污染及营养盐较高的流水环境[22]，表明中下游河段水体可能富营养化。

3.2 环境因子对硅藻群落结构的影响

河流中附着硅藻群落的分布与多种环境因素密切相关，包括水温、水动力条件及营养盐水平等[36-41]。在过去的研究中已明确指出，WT 和营养盐(TP、TN、COD_{Mn})是影响汾河太原段附着硅藻群落结构变化的主要环境因素[42]。本研究在更广泛的空间尺度上对这些环境因素进行了验证。基于环境因子筛选与 RDA 排序结果，WT、TP、pH、DO 和 TDS 共同构成解释附着硅藻群落时空分异的驱动因子组合。WT 被认为是影响藻类地理分布与季节演替的关键环境因子之一[43]。大量研究表明，WT 不仅可以通过调节酶活性直接影响硅藻的光合作用效率、营养盐吸收速率及细胞分裂周期，还可以通过影响溶解氧饱和度、水体分层与混合强度及营养盐循环过程，间接塑造群落的时空格局[44-45]，且已有研究证明，低温条件下水中溶解氧通常较高[42]。我们的研究也证实了这一点：夏季的平均水温显著高于其他季节，而溶解氧浓度低于其他季节。WT 与 DO 呈现负相关关系，夏季样点主要分布在高温区域，冬季样点则位于相对较低的温度区域，春季和秋季介于两季之间。此结果与以往的研究一致，表明温度是驱动附着硅藻群落季节性变化的重要因子[45-46]。pH 值同样是制约硅藻生长和分布的重要因素，pH 可通过影响硅藻细胞的离子平衡、硅壳形成过程及营养盐有效性，对其产生直接或间接的生理胁迫[47]。环境因子贡献率分析表明，pH 在汾河水体中对附着硅藻群落的分布起到了显著作用，与陈凌云对白龙江流域硅藻群落研究的发现相似[48]。本研究中，汾河水体 pH 值整体处于偏碱性范围，符合多数淡水生态系统中硅藻适宜生长的环境特征[36-37]。营养盐，尤其是 TP，是调控附着硅藻群落结构的另一关键环境因子[49]。已有研究表明，TP 在淡水生态系统中往往为限制性营养元素，其浓度变化可直接改变硅藻的代谢强度及群落组成[50]，例如，Guo 等对黄河中下硅藻群落多样性的空间格局进行调查，发现 TP、TN、浊度是硅藻多样性的主要驱动因素[51]。在本研究的 RDA 排序中，上、中、下游样点沿营养盐梯度呈明显分离趋势，各季节上中下游样点分布与 TP 箭头所指方向一致，表明随着营养盐浓度升高，硅藻群落的结构发生了显著的空间分异。汾河中下游区域受工业排放、农业径流及城市生活污水输入影响显著，营养盐浓度升高[52]，本研究发现，在上述高营养盐压力下，中下游硅藻群落出现了出现了群落均质化现象，并且指示富营养化的物种比例明显增加。这一现象与 Guo 等在黄河中下游的研究结果相符[51]，进一步证明了营养盐在富营养化河流中对硅藻群落的驱动作用。值得强调的是，尽管附着硅藻的栖息地多为近岸或缓流微环境，这类微环境并未削弱附着硅藻对主体河流水质梯度的响应能力，反而通过整合局地与区域尺度环境信息，使其成为河流生态评价中具有代表性的生物指标[53]。本研究结果与之前汾河浮游植物的研究结果相一致[14-15]，相较于浮游植物群落易受瞬时水文条件剧烈波动的影响，附着硅藻群落结构因其固着生长的生活方式而更为稳定，能够更可靠地反映水环境质量的阶段性变化和长期趋势[54]。

综上所述，本研究通过对汾河附着硅藻群落与环境因子的分析，有效揭示了环境因子对附着硅藻群落分布的影响。

4 结论

1）汾河干流四个季节工鉴定出附着硅藻 374 种（含变种和变形）。汾河干流附着硅藻群落结构具有显著的时空分布差异：季节尺度上，秋季物种数最高；空间尺度上，上游河段物种数显著高于中、下游河段。

2）α 多样性分析表明，附着硅藻群落在四个季节之间差异不显著，但在空间上差异显著——上游河段的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数均显著高于中、下游河段。β 多样性分析进一步证实，上游与中、下游河段之间的群落结构存在明显分异。

3）RDA 分析表明，WT、pH、DO、TDS 和 TP 是影响汾河附着硅藻群落结构的主要驱动因子。季节动态与营养盐输入共同决定了汾河干流水生态系统中附着硅藻群落的结构与演替。本研究可为汾河流域水生态健康评估、生物监测和水环境管理提供科学依据。

5 参考文献

[1] Chatháin BN, Harrington TJ. Benthic diatoms of the river deel: Diversity and community structure. *Biology and Environment*: *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 2008, **108B**(1): 29-42.

[2] Han N, Zhu YQ, Xiao LJ *et al*. Responses of phytoplankton and periphytic diatoms to environmental factors in a tropical riverine reservoir. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(6): 1263-1269. [韩诺, 朱忆秋, 肖利娟等. 一座河道型水库浮游植物与附着硅藻群落对环境变化的响应比较. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(6): 1263-1269.]

[3] Thorp JH, Delong MD. Dominance of autochthonous autotrophic carbon in food webs of heterotrophic rivers. *Oikos*, 2002, **96**(3): 543-550. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2002.960315.x.

[4] Chen C, Tan L, Zhu KP *et al*. Temporal and spatial heterogeneity of the benthic diatom community and influencing factors in liuxi river, South China. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(6): 92-101. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202108310306. [陈慈, 谭琳, 朱昆鹏等. 流溪河底栖硅藻群落结构的时空异质性及其影响因素. 水生态学杂志, 2022, **43**(6): 92-101.]

[5] Shan T, Yuan AL, Huang ZR *et al*. Characteristics of benthic diatom community structure and water ecological health evaluation in the lalin river basin. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1465-1474. DOI: 10.13227/j.hjkx.202205168. [单涛, 袁安龙, 黄子芮等. 拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价. 环境科学, 2023, **44**(3): 1465-1474.]

[6] Zelnik I, Germ M, Golob A *et al*. Differences in phytobenthic diatom community between natural and channelized river sections. *Plants*, 2023, **12**(11): 2191. DOI: 10.3390/plants12112191.

[7] Datta A, Marella TK, Tiwari A *et al*. The diatoms: From eutrophic indicators to mitigators. *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*. Cham: Springer, 2019: 19-40. DOI: 10.1007/978-3-030-13913-1_2.

[8] Stevenson RJ, Pan YD, van Dam H. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. *The Diatoms*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010: 57-85. DOI: 10.1017/cbo9780511763175.005.

[9] Walsh Walsh G, Wepener V. The influence of land use on water quality and diatom community structures in urban and agriculturally stressed rivers. *Water SA*, 2009, **35**(5): 579-594. DOI: 10.4314/wsa.v35i5.49184.

[10] Guo DY, Wang J, Lin D. Investigation and Consideration on water ecological protection and restoration of “seven rivers” basin in Shanxi Province. *Water Resources Planning and Design*, 2020，(12): 17-19, 43. [郭东阳, 王晶, 蔺冬. 山西“七河”流域水生态保护及修复调研与思考.水利规划与设计, 2020，(12): 17-19, 43.]

[11] Shen HY, Li J, Wang ZH *et al*. Water resources utilization and eco-environment problem of Fenhe River, branch of Yellow River. *Geology in China*, 2022, **49**(4): 1127-1138. DOI: 10.12029/gc20220407. [申豪勇, 李佳, 王志恒等. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题. 中国地质, 2022, **49**(4): 1127-1138.]

[12] Li ZH, Li JW, Yu HW *et al*. Research on water ecological environment protection and sustainable development strategy of Fen River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(8): 1-11. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2024.0084. [李振涵, 李静文, 于洪伟等. 汾河流域水生态环境保护与可持

续发展策略研究. 环境科学学报, 2024, **44**(8): 1-11.]

[13] 王如. 汾河流域水资源生态环境的可持续发展研究. [学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2013.

[14] Cui M. Analysis on water pollution in Taiyuan section of Fen River. *Shanxi Science and Technology*, 2020, **35**(1): 73-75. [崔苗. 汾河太原段水质污染现状分析.山西科技, 2020, **35**(1): 73-75.]

[15] 张旭芳. 汾河上游藻类植物群落结构及水质评价[学位论文]. 太原: 山西大学, 2014.

[16] Wang AA, Feng J, Xie SL. Phytoplankton community structure and assessment of water quality in the middle and lower reaches of Fenhe River. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 915-923. DOI: 10.13227/j.hjkx.2014.03.015. [王爱爱, 冯佳, 谢树莲. 汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析. 环境科学, 2014, **35**(3): 915-923.]

[17] Feng J, Shen HM, Xie SL. Community structure and water quality analysis of planktonic algae in the Taiyuan segment of the Fenhe River. *Resources Science*, 2011, **33**(6): 1111-1117. [冯佳, 沈红梅, 谢树莲. 汾河太原段浮游藻类群落结构特征及水质分析.资源科学, 2011, **33**(6): 1111-1117.]

[18] 杨静,汾河太原段浮游植物群落多样性及碳、氮动态过程的研究[学位论文]. 太原: 山西大学. 2022.

[19] 李佳佳. 蟒河自然保护区硅藻多样性及时空分布特征[学位论文]. 太原: 山西大学, 2020.

[20] Harding W, Archibald C, Taylor JC. A Methods Manual for the Collection, Preparation and Analysis of Diatom Samples. South Africa：DH Environmental Consulting, 2007：1-60.

[21] 克拉默, 兰格-贝尔塔塔. 欧洲硅藻鉴定系统. 广东: 中山大学出版社. 2012.

[22] Wang JN, Zhang X, Hu E *et al*. Spatiotemporal distribution patterns and driving factors of phytoplankton communities within the Shichuan River, a tributary of the Weihe River in the middle reaches of the Yellow River. *J Lake Sci*, 2026, **38**(2): 512-529. DOI: 10.18307/2026.0212. [王瑾娜, 张鑫, 胡恩等. 黄河中游渭河支流石川河流域浮游植物群落时空分布及驱动因子.湖泊科学, 2026, **38**(2): 512-529.]

[23] Li JR, Li CY, Li X *et al*. Phytoplankton community structure in Wuliangsuhai Lake and its relationships with environmental factors using Canonical Correspondence Analysis. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(6): 1032-1040. [李建茹, 李畅游, 李兴等. 乌梁素海浮游植物群落特征及其与环境因子的典范对应分析. 生态环境学报, 2013, **22**(6): 1032-1040.]

[24] Tan X, Xia XL, Zhao QL *et al*. Temporal variations of benthic diatom community and its main influencing factors in a subtropical river, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(1): 434-444. DOI: 10.1007/s11356-013-1898-0.

[25] Peng D, Jiang XM, Sun X *et al*. Spatio-temporal patterns and influencing factors of phytoplankton communities in the main inflow rivers of Qinghai Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(1): 491-502. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0199. [彭朵, 蒋小明, 孙兴等. 青海湖入湖河流浮游植物群落时空格局及其影响因子. 环境科学学报, 2024, **44**(1): 491-502.]

[26] Yang GY, Tang T, Dudgeon D. Spatial and seasonal variations in benthic algal assemblages in streams in monsoonal Hong Kong. *Hydrobiologia*, 2009, **632**(1), 189-200.

[27] Mangadze T, Bere T, Mwedzi T. Epilithic diatom flora in contrasting land-use settings in tropical streams, Manyame Catchment, Zimbabwe. *Hydrobiologia*, 2015, **753**(1): 163-173. DOI: 10.1007/s10750-015-2203-7.

[28] 何琦. 增江流域和东江惠州段底栖硅藻多样性及分布特征 [学位论文]. 广州: 暨南大学, 2011.

[29] Dalu T, Wasserman RJ, Magoro ML *et al*. Variation partitioning of benthic diatom community matrices: Effects of multiple variables on benthic diatom communities in an Austral temperate river system. *Science of the Total Environment*, 2017, **601**: 73-82. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.162.

[30] Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW *et al*. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(1): 130-137. DOI: 10.1139/f80-017.

[31] Triest L, Lung'ayia H, Ndiritu G *et al*. Epilithic diatoms as indicators in tropical African rivers (Lake *Victoria* catchment). *Hydrobiologia*, 2012, **695**(1): 343-360. DOI: 10.1007/s10750-012-1201-2.

[32] Yu ZL, Chen W, Zhao R *et al*. Periphytic algae community structure and its relation to environment factors in the main stream of the Songhua river from 2014 to 2019. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 819-830. DOI: 10.13227/j.hjkx.202007175. [于宗灵, 陈威, 赵然等. 松花江干流 2014—2019 年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应. 环境科学, 2021, **42**(2): 819-830.]

[33] Bere T, Mangadze T. Diatom communities in streams draining urban areas: community structure in relation to environmental variables. *Tropical Ecology*, 2014, **55**(2), 271-281.

[34] Potapova M, Charles DF. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. *Ecological Indicators*, 2007, **7**(1): 48-70.

DOI: 10.1016/j.ecolind.2005.10.001.

[35] Van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Netherland Journal of Aquatic Ecology*, 1994, **28**(1): 117-133. DOI: 10.1007/BF02334251.

[36] Shibabaw T, Beyene A, Awoke A *et al*. Diatom community structure in relation to environmental factors in human influenced rivers and streams in tropical Africa. *PLoS One*, 2021, **16**(2): e0246043. DOI: 10.1371/journal.pone.0246043.

[37] Teittinen A, Taka M, Ruth O *et al*. Variation in stream diatom communities in relation to water quality and catchment variables in a boreal, urbanized region. *Science of the Total Environment*, 2015, **530**: 279-289. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.101.

[38] He Q, Wei GF, Liu J *et al*. Species diversity and spatial distribution of benthic diatom in Zeng River, Guangdong Province, Southern China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2011, **19**(3): 245-253. [何琦, 韦桂峰, 刘静等. 增江底栖硅藻种类多样性及分布特征. 热带亚热带植物学报, 2011, **19**(3): 245-253.]

[39] Jakobsen HH, Blanda E, Staehr PA *et al*. Development of phytoplankton communities: Implications of nutrient injections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, **473**: 81-89. DOI: 10.1016/j.jembe.2015.08.011.

[40] Besse-Lototskaya A, Verdonschot PFM, Coste M *et al*. Evaluation of European diatom trophic indices. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(2): 456-467. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.06.017.

[41] Ji LL, Zhao L, Ouyang T *et al*. Influence and driving of environmental heterogeneity on the epilithic diatom community in Xiangxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir area. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2083-2092. DOI: 10.13227/j.hjkx.202206113. [纪璐璐, 赵璐, 欧阳添等. 环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用. 环境科学, 2023, **44**(4): 2083-2092.]

[42] Zhao KX, Yang J, Lv JP *et al*. Structural characteristics of periphytic algal community and its relationship with environmental factors in the Taiyuan Region of the Fenhe River. *Water*, 2022, **14**(14): 2151. DOI: 10.3390/w14142151.

[43] Sun MX, Zhang WM, Wang DQ *et al.* Spatial and temporal characteristics of phytoplankton community structure and its driving environmental factors in the Ganjiang River at Ji'an Section. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2026: 1-12. DOI: 10.11988/ckyyb.20250942. [孙铭雪, 张文敏, 汪登强,等. 赣江流域吉安段浮游植物群落结构特征及其关键驱动因子. 长江科学院院报, 2026: 1-12.]

[44] Delgado C, Feio MJ, Pardo I *et al*. Effects of water temperature over benthic diatom communities: Insights from thermal springs. *Plant Ecology & Diversity*, 2020, **13**(3/4): 325-337. DOI: 10.1080/17550874.2020.1762133.

[45] Zhao QH, Sun GD, Wang JJ *et al*. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 385-393. DOI: 10.18307/2018.0210. [赵巧华,孙国栋,王健健等.水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响.湖泊科学,2018,**30**(2):385-393.]

[46] Qian XY, Li JB, Ao W, *et al*. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Lake Hulun. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 1816-1829. DOI: 10.18307/2022.0603. [钱玺亦,李金彪,敖文等.呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系.湖泊科学,2022,**34**(6):1816-1829.]

[47] Gensemer RW. The effects of pH and aluminum on the growth of the acidophilic diatom Asterionella ralfsii var. Americana. *Limnology and Oceanography*, 1991, **36**(1): 123-131. DOI: 10.4319/lo.1991.36.1.0123.

[48] Chen LY, Xu X, Liu L *et al*. Study on community structure and taxonomic diversity of planktic diatom in Diebu-Wudu section of Pai-lung River. *Ecological Science*, 2025, **44**(5): 241-251. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2025.05.023. [陈凌云, 徐笑, 刘乐等. 白龙江迭部—武都段浮游硅藻群落结构及分类多样性研究. 生态科学, 2025, **44**(5): 241-251.]

[49] Zhao YJ, Wang R, Qiu HS *et al*. The long-term dynamics of biodiversity and stability of the diatom community under climate warming in a Tibetan alpine lake. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 2025, **667**: 112882. DOI: 10.1016/j.palaeo.2025.112882.

[50] Jeppesen E, Peder Jensen J, SØndergaard M *et al*. Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: Changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, 2000, **45**(2): 201-218. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2000.00675.x.

[51] Guo QY, Zhu Q, Peng PF *et al*. Spatial pattern and environmental determinants of benthic diatom diversity in the middle and lower reaches of the Yellow River. *Frontiers in Microbiology*, 2025, **16**: 1677888. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1677888.

[52] Song CY, Zhang PF, Li XL *et al*. Spatial and temporal characteristics and potential risks of agricultural surface pollution in Fenhe River basin. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, **45**(3): 717-726. DOI: 10.11654/jaes.2025-0177. [宋彩云, 张鹏飞, 李晓璐等. 汾河流域农业面源污

染时空分布特征及潜在风险分区.农业环境科学学报, 2026, **45**(3): 717-726.]

[53] Liu C, Liu XY, Zhou JC *et al*. Response of stream benthic algal diversity to urbanization: A case study in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(24): 10041-10050. [刘婵, 刘心怡, 周佳诚等. 河流着生藻类多样性对城镇化的响应——以深圳市为例. 生态学报, 2022, **42**(24): 10041-10050.]

[54] 刘园园. 着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究 [学位论文]. 重庆: 西南大学, 2018.